

УДК 539.3

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЛОШНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ И ОДНОВРЕМЕННОГО СДВИГА

© Л.Г. Карьев, Н.П. Жукова, В.П. Новиков, Т.Н. Плужникова

Ключевые слова: поликристаллические металлы; восстановление сплошности; одноосное сжатие; распределение тепла; математическая модель.

Проведено теоретическое исследование распределения тепла в поликристаллических металлах и установлена возможность восстановления сплошности последних под воздействием одноосного сжатия образцов и одновременно сдвига.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление сплошности ионных кристаллов под действием одноосного сжатия [1] стимулировало постановку подобных опытов с металлами.

Работа посвящена оценке качества схватывания поверхностей поликристаллических металлических образцов под воздействием одноосного сжатия и одновременного сдвига, а также теоретическому исследованию и построению математической модели, позволяющей прогнозировать температуру контактирующих поверхностей металлических образцов, зависящую от условий эксперимента и физических свойств последних.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали ГЦК поликристаллы электротехнического алюминия (Al), технически чистой меди (Cu), сплава Pb+Sb (92 % Pb, 8 % Sb). Концентрация примесей в образцах Al и Cu не превышала 0,5 и 0,1 % соответственно. Размеры образцов: алюминиевая пластина 40×20×3 мм, на которую помещали образец (Al) с размерами 15×10×10 мм; медные пластины, размерами 60×20×1 мм и 11×11×10 мм соответственно; сплав Pb+Sb – пластина 45×20×3 мм и шестигранный образец со стороной 6,3 мм. Рабочие поверхности металлов перед опытом шлифовали и полировали. Подготовленные пары образцов подвергали воздействию одноосного сжатия на твердомере ТШ-2М. Напряжения $\sigma_{сж}$ варьировали в пределах: $1,63 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 \leq \sigma_{сж} \leq 9,8 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$; $1,71 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 \leq \sigma_{сж} \leq 19,6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$; $0,16 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 \leq \sigma_{сж} \leq 1,96 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ для алюминия, меди и сплава Pb+Sb соответственно; что не превышало предела текучести для этих материалов. Время воздействия составляло ~30 секунд. Для удаления поверхностной окисной пленки и образования ювенильных поверхностей образцы под предварительной нагрузкой (~30 % от окончательной) поворачивали относительно друг друга на угол до 30°. Для количественной оценки качества восстановления сплошности образцы исследовали на разрыв на электромеханиче-

ской машине INSTRON 5565 в специальных захватах, не деформирующих зону восстановления сплошности. Напряжения разрыва сравнивали с табличными значениями временных напряжений разрыва.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После каждого опыта на поверхностях разрыва металлографическими методами определяли площадь схватывания образцов. По измеряемым значениям силы разрыва и площади восстановленной сплошности рассчитывали нормальные напряжения разрыва (рис. 1).

Полученные зависимости позволяют установить наиболее эффективные соотношения между напряжениями сжатия и напряжениями разрыва. Проведено также сравнение нормальных напряжений разрыва с табличными значениями временного напряжения разрыва $\sigma_{вр}$ (табл. 1).

При предложенном способе восстановления сплошности металлов, во избежание плавления последних на участке контакта, необходимо учитывать угловую скорость вращения ω образцов относительно друг друга, коэффициент трения металлов и нормальную прижимающую силу, действующую на образцы. В связи с этим была рассчитана мощность трения в зависимости от перечисленных факторов.

Расчетная модель представляет собой систему, состоящую из двух металлических дисков (в общем случае металлы дисков могут быть разными) радиуса R , прижатых друг к другу нормальной силой N , коэффициент трения скольжения между дисками μ .

Разбиваем поверхности дисков на элементарные кольца шириной dx (рис. 2).

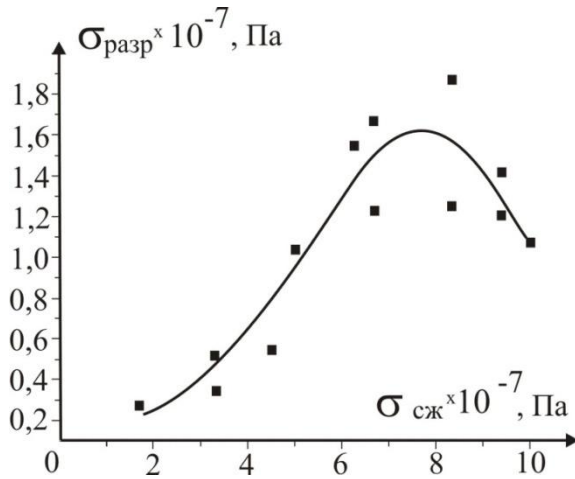
Площадь элементарного кольца: $ds = \pi(x + dx)^2 - \pi x^2 \approx 2\pi x dx$; (членом $(dx)^2$ пренебрегаем). Очевидно, нормальная прижимающая сила, приходящаяся на элементарное кольцо шириной dx , будет

$$dN = \frac{N}{\pi R^2} \cdot 2\pi x \cdot dx.$$

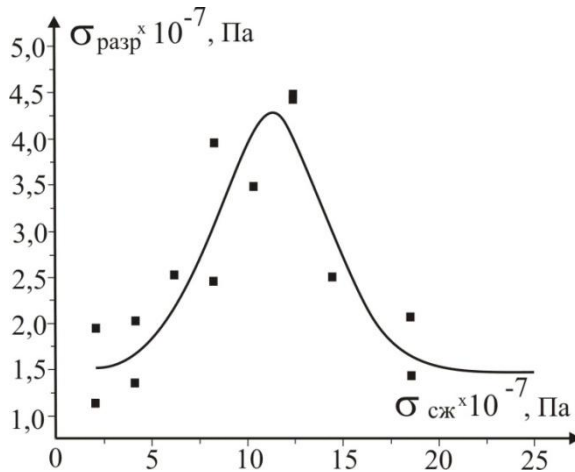
Таблица 1

Соотношение между напряжениями сжатия и напряжениями разрыва для максимального значения прочности соединения

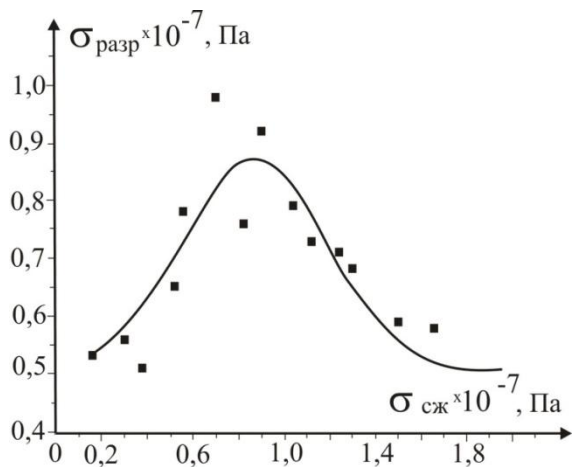
Металл	$\sigma_{сж} \cdot 10^{-7}, \text{ Н/м}^2$	$\sigma_{разр} \cdot 10^{-7}, \text{ Н/м}^2$	$\frac{\sigma_{разр}}{\sigma_{сж}}$	Восстановление прочности, %
Al	7,7	1,6	2,1	16,3
Cu	11,5	4,25	3,7	18,8
Pb+Sb	0,87	0,88	10,1	8,9



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимости напряжения разрыва от напряжения сжатия: а) Al; б) Cu; в) Pb+Sb

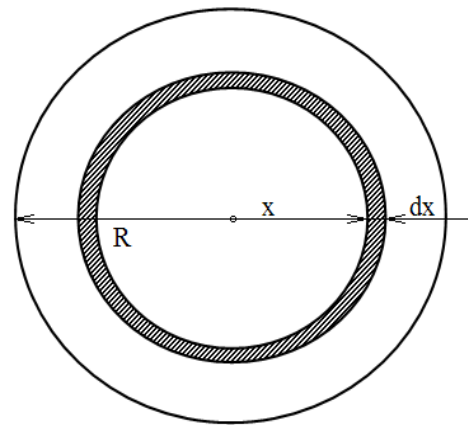


Рис. 2. Разбиение поверхности дисков на элементарные кольца

Элементарная работа dA силы трения, соответствующая элементарному кольцу, при повороте дисков относительно друг друга на угол γ :

$$dA = \frac{2\mu N \gamma x^2}{R^2} dx,$$

Силу трения вычисляли по формуле $F_{тр} = \mu N$ [2]. С учетом того, что $\gamma = \omega t$ (t – время вращения дисков), μ – коэффициент трения.

$$A = \int_0^R \frac{2\mu N \gamma}{R^2} x^2 dx = \frac{2}{3} \mu N R \omega t$$

Мощность трения W :

$$W = \frac{2}{3} \mu N R \omega \quad (1)$$

Рассчитаем критическую угловую скорость $\omega_{кр}$, при превышении которой соприкасающиеся поверхности достигнут температуры плавления. Пусть образцы – тонкие диски. Тогда нагреваемые вследствие трения контактируемые поверхности можно с некоторым приближением считать внутренними источниками тепла, распределенным по всему объему двух дисков. Свободные торцы дисков теплоизолированы. Распреде-

ние тепла должно соответствовать равенству: $q_1 = q_2 + q_3 + q_4$, где $q_1 = Wdt$ – количество тепла, выделяющееся в течение времени dt за счет трения образцов; $q_2 = c\rho Vdt$ – количество тепла, затрачиваемое на нагревание дисков за время dt ; $q_3 = \alpha S_1 \Delta T dt$ – тепло, отдаваемое дисками в окружающую среду за счет теплоперехода металл–воздух за время dt ; $q_4 = \beta S_2 (T^4 - T_0^4)$ – тепловое излучение с поверхности дисков [3]. Следовательно:

$$Wdt = c\rho Vdt + \alpha S_1 \Delta T dt + \beta S_2 (T^4 - T_0^4); \quad (2)$$

T – абсолютная температура. В момент времени $t = 0$, $T = T_0 = 293 \text{ K}$; V – объем дисков; c – удельная теплоемкость материала дисков; ρ – плотность вещества дисков; α – коэффициент теплоперехода с боковой поверхности дисков в окружающую среду. Так как два прижатых друг к другу диска образуют цилиндр, то S_1 – площадь боковой поверхности этого цилиндра; S_2 – площадь всей его поверхности; β – коэффициент теплового излучения металла с поверхности.

$$\beta \approx 2,268 \times$$

Например, для медных дисков, с учетом формул (1, 2) и значений параметров: $\mu \approx 1,4$; $\beta \approx 2,268 \times 10^{-9} \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$; $\alpha = 5,6 + 4v = 5,6 + 2\omega R$ [2, 4] (v – линейная скорость точек обода дисков, $\frac{\omega}{2}$ – угловая скорость дисков); $R = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; толщина каждого диска – $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; температура плавления $T_{\text{пл}} = 1356 \text{ K}$; $N = 4700 \text{ Н}$, получаем зависимость температуры металла от времени для различных ω , график интерпретации которых представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что нагрев образцов (за время их относительного поворота) до температуры плавления возможен лишь при больших значениях ω , что в реальном эксперименте не реализуется.

Для случая относительно небольших угловых скоростей ω , когда тепловым излучением с поверхности дисков можно пренебречь при отмеченных выше значениях параметров, получаем зависимость критической угловой скорости вращения дисков, при которой происходит плавление металла, от времени (рис. 4).

Числовые значения параметров, используемые в расчетах, соответствуют условиям эксперимента. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными, подтверждая, что испытуемые образцы металла в ходе эксперимента не достигли температуры плавления.

Восстановить сплошность металлических образцов можно путем совмещения их поверхностей под механическим давлением и разрушения окисных пленок, покрывающих контактирующие поверхности. При этом специальная полировка, особые условия подготовки образцов не гарантируют надежно воспроизводимое схватывание металлических образцов.

Зависимости $\sigma_{\text{разр}} = f(\sigma_{\text{сж}})$ показывают, что существуют наиболее эффективные напряжения сжатия образцов по отношению к напряжению разрыва. При этом достигается максимальная прочность участков восстановленной сплошности (~10–20 % от исходной) на образцах, подвергнутых одноосному сжатию, ортогональному плоскости восстановления сплошности в совокупности с относительным поворотом поверхно-

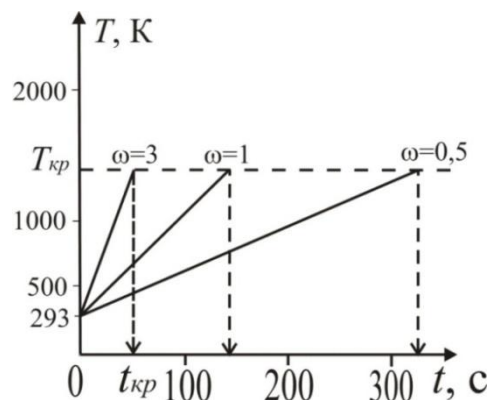


Рис. 3. Зависимость температуры металла от времени для различных ω

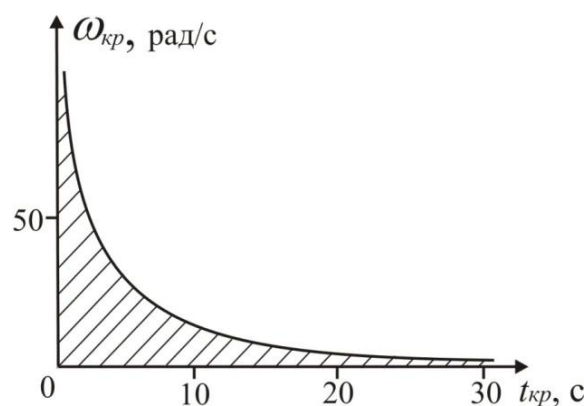


Рис. 4. Зависимость критической угловой скорости вращения дисков от времени. Заштрихованная область – область допустимых значений $\omega_{кр}$ и t , при которых не происходит плавление металла

стей, позволяющим разрушить поверхностную пленку, являющуюся препятствием для схватывания.

Большое влияние на качество схватывания металлических образцов оказывает твердость и химические свойства, от которых зависит возможность удаления поверхностной окисной пленки и вскрытия ювенильных поверхностей. При сближении ювенильных поверхностей происходит перекрытие потенциала металлической связи, что обеспечивает восстановление сплошности.

ВЫВОДЫ

Установлена возможность восстановления сплошности в поликристаллических металлах под воздействием одноосного сжатия ортогонального плоскости схватывания при одновременном удалении окисных пленок. Выявлены наиболее эффективные напряжения сжатия образцов по отношению к напряжению разрыва.

Получены зависимости $T(t, \omega)$, позволяющие подбирать параметры механического взаимодействия металлических образцов, при которых происходит восстановление сплошности между ними в температурном интервале существования металлов в твердой фазе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Тялин Ю.И. Залечивание трещин, остановившихся при несимметричном сколе в щелочногалоидных кристаллах и кальците // ФТТ. 2000. Т. 42. № 4. С. 685-687.
2. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лившиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М.: Наука, 1969. 399 с.
3. Гребер Г. Введение в теорию теплопередачи. М.: ГОСТЕХИЗДАТ, 1929. 194 с.
4. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.

Поступила в редакцию 21 ноября 2011 г.

Karyev L.G., Zhukova N.P., Novikov V.P., Pluzhnikova T.N.
RESTORATION CONTINUITY OF POLYCRYSTALLINE
METALS IN CONDITIONS OF UNIAXIAL COMPRESSION
AND SIMULTANEOUS TRANSLATION

The theoretical investigation of heat distribution in polycrystalline metals is made and the possibility of restoring of continuity of the latter under the influence of uniaxial compression of samples and the simultaneous translation is established.

Key words: polycrystalline metals; restoration of continuity; uniaxial compression; heat distribution; mathematical model.